

降低计轴设备受牵引电流干扰的误码率新方法研究

罗航

中铁八局集团电务工程有限公司, 四川 成都 610000

[摘要] 交直流牵引供电制式应用广泛, 在市域铁路中大量采用, 然而牵引电流对计轴装置产生较强的电磁污染使计轴计数错误增加, 影响列车的安全运营。论文对牵引电流电磁污染频谱特性、传播途径进行详细阐述, 阐述了计轴信号受到耦合的影响原因及现有抗干扰措施的不足之处。针对此情况提出一种新的综合防干扰方案, 即高抗干扰传感器及其前端电路改进、基于自适应滤波器的实时信号过滤、干扰源检测及智能告警提示措施以及系统的容错冗余设计等几种方法。

[关键词] 计轴设备; 牵引电流; 电磁干扰; 误码率; 自适应滤波

DOI: 10.33142/ec.v9i4.19483

中图分类号: U284.2

文献标识码: A

Research on a New Method to Reduce the Error Rate of Axle Counting Equipment Affected by Traction Current Interference

LUO Hang

China Railway No.8 Engineering Group Electric Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: The AC/DC traction power supply system is widely used in urban railways. However, the traction current causes strong electromagnetic pollution to the axle counting device, leading to an increase in counting errors and affecting the safe operation of trains. The paper elaborates in detail on the spectral characteristics and propagation pathways of electromagnetic pollution caused by traction current, and explains the reasons for the coupling effect of axle counting signals and the shortcomings of existing anti-interference measures. A new comprehensive anti-interference scheme is proposed for this situation, which includes improving high anti-interference sensors and their front-end circuits, real-time signal filtering based on adaptive filters, interference source detection and intelligent alarm prompt measures, and fault-tolerant redundancy design of the system.

Keywords: axle counting equipment; traction current; electromagnetic interference; error rate; adaptive filtering

计轴装置是列车占用轨道区间的重要监测设备, 利用安装于钢轨上的磁头感应车轮电磁波的变化来确定该段轨道有无列车运行状态, 随着 25kV 交流电牵引供电方式普遍使用, 由于机车牵引电流及谐波经传导或辐射的方式对计轴磁头进行耦合引起误码率增加或者出现红光带现象造成安全隐患。交流牵引引发的干扰成为影响计轴系统准确应用于复杂的电磁环境的一个主要的技术难题。当前所采取的抗干扰措施主要有硬件隔离、信号编码以及软件滤波等方式但是都存在各自缺陷, 在复杂的工作条件下很难达到预期的效果从而不能够确保其准确性。所以探讨如何有效的减小牵引电流引起的干扰误码问题就显得尤为重要了。

1 牵引电流干扰特性与误码产生机理

1.1 牵引电流干扰的频谱与时域特征

牵引电流干扰频谱为宽带型且含有多个谐波成分。而

电力电子装置在牵引变流装置中进行高频切换使得谐波含量较高, 频率范围从工频 50Hz 到几千赫兹, 与计轴装置的工作频率相重叠造成直接受扰。在频域上牵引电流干扰频率是动态分布的, 在不同的运行状态其干扰的频率组成有较大区别; 在时域上牵引电流是由瞬时冲击加恒定周期信号组成的复合波形, 在列车起动、制动时会出现较大的电流脉动以及断路器断开瞬间出现的极大幅值、极短的冲击电流在很短时间内耦合到传感器, 从而引起信号波形失真以及失脉冲现象的发生。断路器闭合状态时造成的过电流经高压线流入钢轨, 再由钢轨辐射至轨道电路对计轴器造成严重干扰, 在极端情况下的磁场强度甚至会超出干扰阈值 16dB 左右。

1.2 干扰传导路径与计轴信号耦合机制

牵引电流干扰传导主要有传导耦合与辐射耦合两种方式。传导耦合路径就是牵引电流经由钢轨回到变电站,

当牵引电流在钢轨电阻上的压降造成轨与地间的电势差时,依靠计轴传感器安装底盘、信号电缆屏蔽层等导体形成干扰电流回路干扰前端电路^[1];干扰传导路径复杂可使得防护设计困难重重。辐射耦合则是计轴传感器安装在钢轨腰部或是轨底附近,处在牵引电流形成的交变电磁场当中,传感器线圈借助电磁感应接收干扰信号及有用信号混杂在一起。断路器分闸暂态过程引起的高频电磁辐射经空气耦合在传感器和连线电缆中引起感应电压从而造成计轴脉冲误计数或者漏计数现象的发生。

2 现有抗干扰技术及其局限性

2.1 硬件屏蔽与接地技术

硬件屏蔽采取高导磁率材质封装传感器壳体、信号电缆双层屏蔽降低外界干扰影响、接地方式采用一点接地方式消除地环路影响。硬件隔离及接地策略虽然在一定程度上降低了传导性影响源,但是对电磁场辐射的影响较小。而常用的防电磁波屏蔽器件对于高频段干扰屏蔽作用减弱;此外,地回路自身也可能导致电磁干扰进入电路系统内,屏蔽层内部存在的寄生电感与分布电容也会造成复杂的阻抗效应,无法达到理想的抗强干扰性能指标。

2.2 信号调制与编码方案

信号调制、编码主要是对有用信号在频域进行变换,使它与其他信道的干扰频谱分离开来避免互相干扰,计轴系统则使用固定频率的正弦波载波进行调制,在编码部分还加入了 CRC 循环冗余检查以及前向纠错编码,提升了解码成功的概率。由于干扰有宽带性质,其频谱覆盖到了工作区间必然就会产生交叠,高阶数的纠错虽然提高了抗干扰水平但是带来了较长的时间延迟以及复杂程度,当有较强的干扰出现时会造成前端饱和堵塞,使得调制、编码的优势无处体现,即便如此,误码率仍然很高。

2.3 软件滤波与阈值判决

软件滤波运用带通滤波、陷波滤波等算法来消除一些频点间的噪声干扰,阈值判定依据一定的阈值进行车辆过轨与否的确定;固定参数滤波及阈值策略很难应对牵引电流干扰的动态性质,牵引电流干扰的频谱及幅度会根据不同的工作情境而变动,固定滤波器对某一种工况适用但对另一种工况无效,固定的阈值判断容易受到干扰脉冲的影响,复杂的自适应算法嵌入式的实时能力不足,不利于工程实践应用。

3 降低误码率的新方法设计

3.1 高抗干扰传感器与前端电路优化

面对当前传感器存在的强噪声环境中信噪比低现象,

论文研究提出了一种高性能抗干扰传感器的设计方案,在传感器绕制线上使用了差动线圈以及合理地改进磁路结构,在增强对有用信息收集的同时,又能很好地削弱共模噪声的影响。其传感器探头由一对对称绕制线圈组成,安装时位于钢轨两侧;当列车经过两侧产生的磁场不对称时就会得到一个差值信号输出;而牵引电流引起的干扰磁场对传感器有共模作用,用差分电路就可以很好地消除掉;差动结构可以大幅度提升共模噪声的抑制效果,使信噪比得到极大程度上的提升。

前系统电路改进包含:低噪声前置放大、动态范围扩大和过载防护三大关键技术。前置放大电路中设置有限幅保护电路来避免过大干扰造成放大电路饱和和堵塞现象的发生,维持放大电路在线路有用信号频段上不失真线性特性。动态扩增利用了可调增益的方式进行调节,随着干扰程度的不同而改变放大的倍数,使微弱有用的信号可以得到充分加强,在强干扰的情况下不会产生削波失真的情况。滤波网络则是由高阶带通滤波加自适应陷波组成,在保持有用信号频率的同时实时检测并消除牵引电流的主要谐波成分。

3.2 基于自适应滤波的实时信号处理

针对传统的静态参数滤波器存在的不足问题,本文提出了基于自适应滤波实时信号处理的方式,应用自适应策略依据输入信号统计特征来自主调节滤波器系数,达到对时域变化噪声的最佳消除效果的目的。自适应滤波器应用横向结构,把计轴传感器输出当成输入,把牵引电流干扰参考信号设定为期望响应,则用最小均方误差法不断修正系数使得滤波器输出接近干扰分量,从而在原始信号上减去干扰估计便可获得增强有用的信号^[2]。自适应滤波算法能动态识别出干扰的变化情况,在时变的情况下具有优良的抗噪能力。

干扰参考信号提取是自适应滤波的重要步骤之一。文中设计了在计轴装置处安装专门的干扰检测线圈来提取出与牵引电流干扰有关而与实际的信号相独立的参考信号,将此参考信号经一定的延时、增益处理后再送入到自适应滤波器中去。并且考虑到牵引电流干扰本身存在的一定的重复规律,所以在程序上加入了频域自适应运算单元,使时域上的信号变换成频域上再逐个频率进行相应的自适应运算,从而增加对谐波干扰抑制的效果。算法运行的过程中,利用预设好的收敛系数以及遗忘因子来调控自适应速率与稳态偏差大小,在迅速跟随能力和滤波效果间找到一个折中点,使得系统的实时时效可以达到计轴装置所需要的实时反应水平。

3.3 干扰识别与智能诊断机制

为了提升计轴装置对复杂电磁环境的适应水平,本文研究干扰的检测以及智能化诊断方法,在该方法中采用模式识别的方法来实时检测牵引电流干扰的种类、大小、以及频率时间等特征来进行实时检测以作为抗干扰参数自我调节的基础。干扰检测单元从传感器采集的数据中获取信号的时间波形属性、频率分布和统计学属性信息等特征值形成一个特征集输入到分类器当中,从而辨别出哪些是固定的正弦波干扰、突发性的脉冲干扰或是二者混合干扰等等并计算出干扰强度。智能诊断单元让计轴装置拥有环境感知能力和决策判断能力,提升了系统的柔性。

干扰检测的结果用来控制诊断决策单元,它会依据不同的干扰种类大小来选取最适合其抗干扰措施并调节相应参数,在遇到稳定谐波干扰时,使用自适应陷波滤波器来跟踪并减弱最大的几个谐波分量,在出现瞬态冲击干扰时激活脉冲干扰抑制算法,通过中值滤波加形态学处理的方式去除冲击脉冲对计轴信号的影响,在面对多重复杂的组合干扰的情况下,则结合了多种方法且会根据当前实际的表现灵活调整,在此过程中也包含了自我学习的功能,在出现某些典型的干扰现象时将最合理的处理参数保存下来,逐渐积累的干扰样本库使辨别更加精准、解决更为有效。

3.4 系统级容错与冗余策略

基于信号处理技术之上,本文又增加了系统级别的容错及冗余保护措施,通过对多个传感器的数据融合、多重判别来增大计轴结果准确性,在轨道同一点处安装有多套相互独立工作的计轴装置,每个计轴模块有完整的信号采样以及处理电路板,各自独立完成车轮计数并向外发报计轴脉冲信号,多个通道共同传递给合并甄别单元,使用表决的方式以及双机双系统冗余结构来进行一致性验证,只要大多数通道判别结果相同就认为车轮经过,避免了因某单一通道受到外部因素的影响产生错误报警的问题。冗余容错方式可以增强系统的鲁棒性,极大地减少了错码的概率。

融合判决中心也在实时监控各路信号品质情况,当某一路受到干扰比较厉害造成输出结果不对时就自动排除这路,根据剩下的几路来进行判断,并给出警报提示,通道转换与重组无痕,不影响计轴机车持续工作。对于冗余判决以后还有可能存在有疑问的数据,则开启追溯检验程序,综合考虑前辆次和下一辆次运行状况以及轨道区段被占用与否情况来做逻辑判断,减少误断的可能性。系统级容错技术不仅仅提升了单点故障下的利用率,更重要的是多种来源的数据相佐证,大大减少了出错机会,使计轴系统即使在强干扰下也能可靠运行。

4 性能验证与效果分析

4.1 实验平台构建与干扰模拟

为了证明文中提出的方案的有效性,建立完整计轴设备抗干扰测试实验系统。实验系统由计轴传感器及其前置处理单元、牵引电流干扰发生装置、数据采集装置以及性能分析软件四大部分组成。牵引电流干扰发生装置可以产生具有典型交流电气化铁路牵引供电系统干扰特征的频率在10Hz到10kHz之间的稳定谐波干扰和幅度最高达几百安培的脉冲突跳干扰,干扰参数根据试验需要可调可控。实验系统有较强的干扰模拟能力,基本涵盖了现场环境中主要的干扰种类,使测试结果具有较高的参考价值。

测试环境根据轨道交通现场实际情况来布置,在现场实型钢轨区段放置计轴传感器,在钢轨下面铺上道床,并连接模拟接地网,尽可能地模拟现场的电磁环境^[3]。扰动注入方法使用的是传导、辐射两种方式,传导干扰利用专门的耦合器输入到钢轨中,而辐射干扰则是通过布置周围的环形天线产生,模拟牵引电流的空间分布所形成的电磁场。在测试时同步记录下传感器输出信号、处理单元中间节点波形以及最后的计轴结果,使用多通道数据采集装置对所有数据加以保存方便后续研究。

4.2 误码率测试对比分析

误码率测试使用对比实验的方法,分别针对传统抗干扰技术以及本文所提出的新型抗干扰技术进行计轴装置的比较试验,在此过程中设置多种不同的干扰状况,例如不同幅度值的稳态谐波干扰和不同上升速率的瞬时脉冲干扰以及这两者的混合干扰等,每一种状况均进行了至少1000次的车轮模拟试验,记录发生错误比特的数量来求出误码率大小。通过对两种方法的比较可以看出新型抗干扰技术具有更低的误码率。

对于稳态谐波干扰环境,传统的方法能较好地把干扰幅度很低时误码率保持在一个可接受范围内,但是当干扰幅度高于有用信号幅值50%的时候误码率就大幅度增加,在这种情况下传统的误码率降低了近一个数量级。对于瞬态冲击干扰环境,传统的固定门限判定会因为冲击脉冲的影响容易造成误判,随着冲击强度的加大,误码率也明显上升,而新方法利用了扰动辨识及容错判决两种机制有效的对瞬态冲击干扰进行判别并消除干扰影响,其误码率基本维持在1%左右。对于复合干扰环境新方法效果更好,在这个环境中新方法总误码率相比传统方法下降到95%以上。

4.3 抗干扰稳定性评估

抗干扰稳定性检测着重检测的是计轴装置对长时间

工作以及干扰变化情况下的稳定性状态。实验安排连续工作测试,在48h内进行,且在此期间干扰量也随着规定步骤进行变动,以模拟列车运行时牵引电流的变化状况,每小时测量一次误码率数值并记录下来。而稳定性检测主要是为了检验新提出的方法在实际应用场景中的可靠性以及一致性。使用新方法的计轴设备在整个检测过程中所得到的误码率起伏不大,并且也没有产生劣化现象,证明了自适应法可以很好地收敛到最优解,系统参数设计恰当。在干扰参数突变情况下,仪器经一段时间调节之后很快恢复正常工作,调节过程中瞬时误码率增加但是并未产生连续错误,说明了该仪器反应灵敏,具有一定的抗干扰能力;而对照设备面对干扰参数急剧变化的情况,会反复出现工作不稳定的现象,并伴有严重的误码抖动甚至有一段时间内不能正常工作^[4]。稳定性测评结果显示此方法能对牵引电流扰动进行良好的实时监测,在复杂的电磁环境中可长时间平稳工作。

4.4 实时性与可行性分析

实时性也是对计轴装置的基本要求之一,决定着列车的安全以及效率问题,文章从信号处理过程中的各个阶段来对每个阶段所存在的延时进行了测试,其中包括前端采集延时,自适应滤波计算延时以及判决输出延迟。实验结果表明,自适应滤波算法使用的是改进的快速实现方法,每完成一次运算小于1ms,再加上前端采集与输出判断的时间,整个信号处理过程所耗费的延时不超过5ms,符合计轴装置关于实时性的要求,进一步证明了这种方法具有实用价值和可行性。

可行性研究主要从系统复杂程度、成本上升以及工程可实施性三个角度来考察。新方法增加了部分硬件主要是多通道传感器及信号处理装置,均为成熟的工业产品,成本上升较少,能够被接受。自适应滤波算法以及智能化检

测功能由软件实现对运算速度的要求不是很高,目前的嵌入式平台可以满足要求。干扰监测线圈的安装以及布线可以在对原有的计轴设备进行升级时一并解决,不用再占用额外的轨旁资源。总的来看,本文所提出的新方案具有良好的工程可行性和推广价值。

5 结束语

本文对交流牵引供电区段计轴装置由于受到牵引电流的影响而导致错误码率增加的问题在对干扰特性和目前技术限制进行分析之后,提出了减小错误码率的整体新技术方案。该方案以传感器前端改进、自适应滤波技术、干扰自动检测及系统层冗余容错等方面入手,建立起了多层次的联合抗干扰的技术框架,伴随着轨道交通系统向更高速度和更大容量的方向推进,牵引电流带来的影响也越来越大,未来可以从采用深度学习对干扰进行辨别以及运用云计算+边缘计算的智能防护模式来增强计轴装置的自适应能力以及稳定性等方面开展相关的研究工作。

[参考文献]

- [1]郑傲醒,潘林杰.温州市域铁路 S1 线计轴红光带问题分析及解决方案[J].电子技术与软件工程,2021(12):212-213.
 - [2]龚书锦,陈志忠.降低站内无轨道电路区段不平衡牵引电流干扰问题探讨[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(1):18-22.
 - [3]李海龙,闻映红,谢博才,等.牵引电流对轨道电路系统的电磁干扰效应研究[J].北京交通大学学报,2025,49(6):94-100.
 - [4]谢文磊,高佳佳.牵引电流对信号设备的影响分析及措施研究[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(1):106-109.
- 作者简介:罗航(1991.02—),男,汉,重庆大足人,本科学历,工程师,现就职于中铁八局集团电务工程有限公司,研究方向为铁道信号。